

河川堤防材料の細粒分含有率が浸透特性に及ぼす影響

Effects of Fine Fraction Content on Hydraulic Properties of Embankment Materials

金 乗洙 Byeongsu KIM (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
 渡 優樹 Yuki WATARI (西日本高速道路(株))
 加藤 正司 Shoji KATO (神戸大学大学院工学研究科)
 竹下 祐二 Yuji TAKESHITA (岡山大学大学院環境生命科学研究科)

河川堤防に用いられる土質材料について、その細粒分含有率(F_c)の変化が浸透特性値に与える影響、および堤防材料の細粒分含有率が降雨浸透による河川堤防の安全性評価に及ぼす影響について検討した。実際の河川堤防から採取された砂質土(マサ土)を用いて、細粒分含有率を4種類($F_c=10\%$, 25% , 40% , 50%)に調整した試料を作製し、室内土質試験を実施して、飽和透水係数及び水分特性曲線を測定した。不飽和透水係数については不飽和浸透特性値の関数モデルを用いて推定した。さらに、細粒分含有率による飽和・不飽和浸透特性値の変化が河川堤防内の降雨浸透挙動に与える影響について、有限要素法による浸透流解析を用いて感度特性を考察した。その結果、土の細粒分含有率が増加するほど、降雨浸透に対する河川堤防の安全性が高くなる傾向が示された。

キーワード：河川堤防，まさ土，不飽和土，細粒分含有率，浸透流解析 (IGC : E-7, D-4, D-0)

1. はじめに

近年、豪雨による河川堤防決壊が頻繁に発生し、社会的な問題となっている。河川堤防は、粒度分布の良好な土によって構成されているが、降雨時には、雨水の浸透・浸食によって細粒分が流出し、強度変化が懸念される。このため著者らは、細粒分含有率による不飽和土の力学的特性への影響を評価した。その結果、細粒分含有率(F_c)により水分特性曲線が異なり、同じ飽和度でも細粒分含有率が25%以上になると、土のせん断強度の増分におけるサクシヨンの影響が大きくなっていることを示し、河川堤防の地盤材料において、不飽和状態の力学的特性に対する細粒分含有率の重要性を指摘した。本研究では、細粒分含有率の変化が不飽和状態の浸透特性に与える影響について検討し、不飽和浸透流解析を用いて、細粒分含有率による河川堤防内の降雨浸透挙動に与える影響を考察する。

土は水を多く含み飽和状態に近くなるほど強度が低下することが知られている。そのため土の飽和透水係数を知ることによって、堤体内への水の浸入の容易さを把握する必要がある。また、自然状態ではほとんどの場合、土は不飽和状態で存在しているので、水分特性曲線を利用して不飽和透水係数を求め、細粒分含有率による透水特性の変化とその特性を理解する必要がある。しかし、現在まで不飽和状態での細粒分含有率の力学特性および浸透特性への影響に関する研究はほとんど行われていない。このため、河川土工マニュアル²⁾では、堤体材料の細粒分含有率は、土の難透水性を確保するために15%以上、乾燥時にクラックが入らないように50%以下と提案されている。

本研究では、細粒分を調整した試料を使用し、飽和透水

表-1 まさ土の物理特性

項目	物理値
土粒子の密度(ρ_s)	2.58 (g/cm ³)
液性限界(w_L)	N.P
塑性限界(w_P)	24.60 (%)
最大乾燥密度(ρ_{dmax})	1.88 (g/cm ³)
礫 分(75~2mm)	2.80 (%)
砂 分(2~0.075mm)	78.78 (%)
細粒分(0.075mm以下)	18.42 (%)
細粒分含有率	18.42 (%)

係数及び水分特性曲線を室内土質試験によって測定した。また、不飽和透水係数を水分特性曲線より推定し、その結果を用いて有限要素による浸透流解析を行い、各細粒分含有率における土の浸透特性値について評価すること目的とする。

2. 物理特性試験と飽和透水試験

2.1 物理特性試験

表-1 は、本研究で用いた、実際の河川堤防から採取したまさ土試料の物理特性を表したものである。まさ土の土粒子密度は一般的に $\rho_s=2.6\sim 2.8$ g/cm³ といわれているが、本試料では $\rho_s=2.58$ g/cm³ と少し小さい値を示している。液性限界については JIS A 1205 法により試験を行ったが、含水比を求めることができず、 $w_L=N.P$ となった。また、粒度分布(図-2, 黒丸印)から、原試料では2mm以下粒径分が97.2%を占め、その細粒分含有率は、18.42%であることがわかる。そこで、本研究では、図-2に示すような、細粒

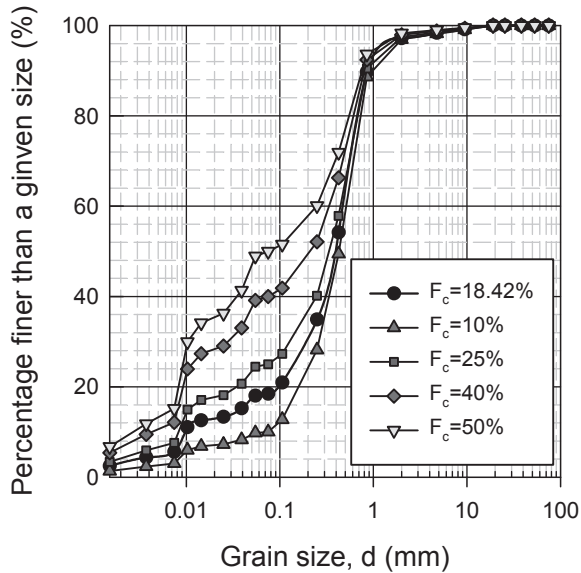


図-2 原試料と細粒分含有率(F_c)調整試料の粒度分布曲線

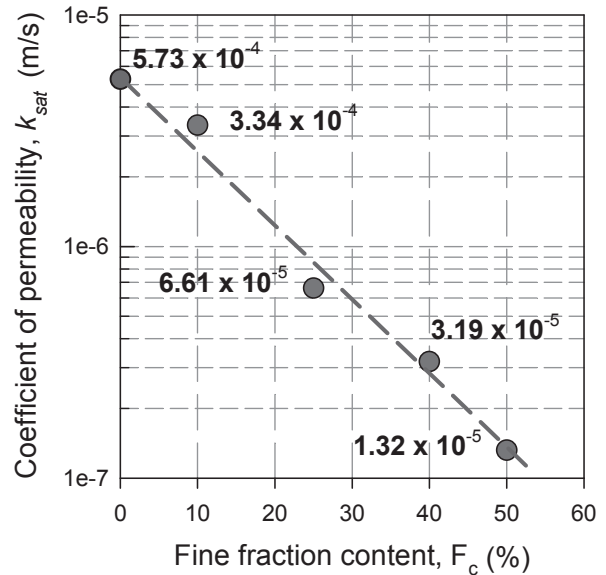


図-4 細粒分含有率調整試料の飽和透水試験結果

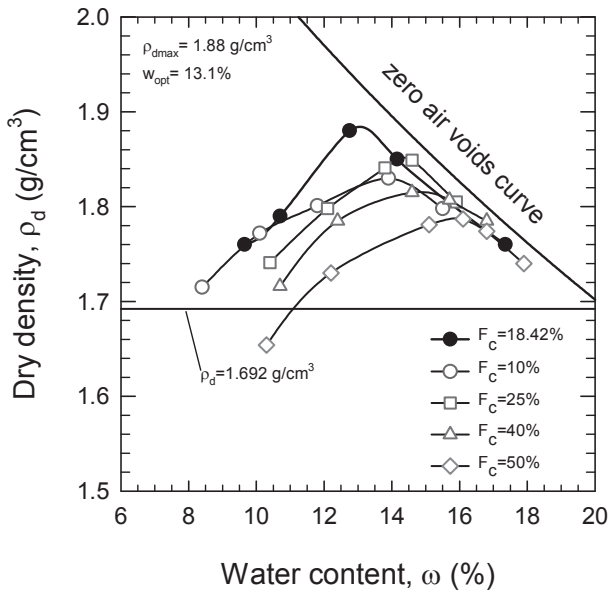


図-3 細粒分含有率(F_c)によるまさ土の締固め曲線

分含有率が 10%, 25%, 40%, 50%の粒度分布になるように粒度調整した試料を作製した。一方, 締固め試験 (JIS A1210) の結果を図-3 に示しているが, 原試料 (黒丸印) では最大乾燥密度 1.88 g/cm^3 , 最適含水比 13.1% が得られ, 砂質土の特徴的な締固め曲線となった。図-3 中には, 細粒分含有率 10%, 25%, 40%, 50%の調整試料の締固め試験の結果も示しており, 細粒分含有率が増加すると最適含水比が上昇し, 最大乾燥密度が低下することが確認された。

2.2 飽和透水試験

変水位透水試験 (JISA1218) を適用し, 飽和透水係数を求めた。図-4 に, 飽和透水係数と細粒分含有率の関係を示す。細粒分含有率が高くなるにつれ, 飽和透水係数は小さくなっている。細粒分含有率が 10%から 25%に増加した場合, 飽和透水係数は大きく変化しているが, 細粒分含有率が 40%, 50%の場合, 飽和透水係数は小さくなっている。

ものの変化が少なかった。この理由は, 細粒分に含まれる $5\mu\text{m} \sim 75\mu\text{m}$ のシルト分が多く, $5\mu\text{m}$ 以下の粘土分が少なかったためであると考えられる。

細粒分含有率 10%の透水係数の結果を基準とした場合, 飽和透水係数の低下率は, 細粒分含有率の増加により, $F_c = 25\%$ では $1/5.0$, $F_c = 40\%$ では $1/10.5$, $F_c = 50\%$ では $1/25.3$ になる。

また, 図-4 において, 細粒分含有率と飽和透水係数の関係が直線的な比例関係になっていることが分かる。そこで細粒分含有率調整試料で得られた値から近似直線を求めて, 細粒分含有率 0% (完全に細粒分が流出) の場合の透水係数を外挿すると, $5.57 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ と予測される。本研究の堤防材料については, 細粒分含有率(F_c)と飽和透水係数の間にユニークな結果が得られた。しかし, この関係を堤防現場の試料について適用するためには, 今後, 他の試料においても検討する必要があると考えられる。

3. 保水性試験による不飽和透水係数の推定

3.1 保水性試験

本研究では, 加圧法 (JGS 0151) によって水分特性曲線を求め, 細粒分含有率調整試料について水分特性曲線の変化を把握した。まず試料を現場密度で静的に締固めて供試体を作製し, 毛管飽和させた。試験では, 供試体に鉛直軸荷応力は与えず, セル圧 (間隙空気圧) を段階的に増加させて排水過程を行った。供試体に与えるセル圧としての空気圧は, 段階的に $2 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 20 \rightarrow 50 \rightarrow 100 \rightarrow 200 \rightarrow 400 \text{ kPa}$ まで与えられ, 各段階での水分変化量から体積含水率が求められた。

測定された水分特性曲線をフィッティングするために, Fredlund and Xing³⁾の提案式 (F&X model) 式 (1) を用いた。表-2 は, まさ土試料の試験結果に対して得られたフィッ

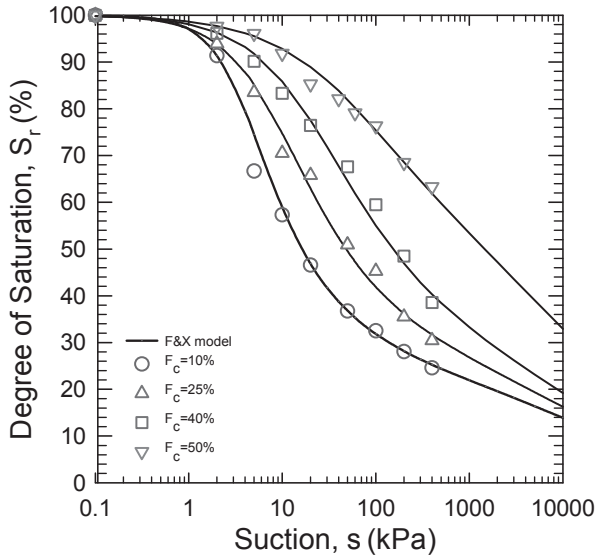


図-5 細粒分含有率調整試料の水分特性曲線(排水経路)

表-2 水分特性曲線におけるフィッティングパラメーター

F _c (%)	パラメーター			空気侵入値(kPa)
	a	n	m	
10	3.20	1.72	0.64	1.71
25	6.00	1.19	0.70	2.39
40	14.20	0.98	0.73	5.09
50	29.50	0.78	0.54	9.08

フィッティングパラメーターを示している。ここで、空気侵入値は、飽和状態の試料内部の間隙に初めて空気が流入し始める時のサクシジョンの大きさを意味する。

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{[\ln[e + (\psi/a)^n]]^m} \quad (1)$$

ここに、 θ : 体積含水率,
 ψ : 全サクシジョン(kPa),
 θ_s : 飽和体積含水率,
 e : ネイピア数(2.71828),
 $C(\psi)$: 修正関数.

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \quad (2)$$

ここに、 ψ_r : 残留体積含水率に対応するサクシジョン,
 a : フィッティングパラメーター (空気侵入値と関係),
 n : フィッティングパラメーター(水分特性曲線の勾配),
 m : フィッティングパラメーター(残留含水率と関係).

図-5 は、細粒分含有率調整試料の水分特性曲線(排水経路)をそれぞれ示している。この図より、細粒分含有率が高

いほど、同じ飽和度の条件でサクシジョンの値が大きくなる事が分かる。すなわち、細粒分含有量が多いほど、任意のサクシジョンでの水分量はより大きくなり、水分特性曲線の傾斜はゆるくなる事がわかる。

一般に、水分特性曲線は、供試体の乾燥密度が高くなるほど、ある飽和度に対するサクシジョンの値が大きくなる事が知られている。したがって、細粒分含有率の増加は、供試体の乾燥密度が増加する場合と同じような影響を与えると考えられる。

表-2 から、細粒分含有率が増加すると、空気侵入値が大きくなる事がわかる。また、各水分特性曲線でのフィッティングパラメーター(a, n, m)がそれぞれ異なり、特に、フィッティングパラメーター a の値が空気侵入値と連動している事が分かる。

3.2 不飽和透水係数の推定方法

不飽和透水係数は、水分特性曲線を通じて体積含水率(θ_w)の関数として推定されることよく行われる。これは、飽和透水係数に比べてその測定が困難なためであり、試験方法の基準化もなされていないためである。体積含水率と土中水の圧力(サクシジョン)の関係を表す水分特性曲線は、これまで様々なモデルが提案されており⁴⁾⁷⁾、通常、水分特性曲線の実測値に対して関数モデルを適合して用いられる。一方、測定が難しい不飽和透水係数については、Mualem⁷⁾の間隙径分布モデルに代表される不飽和透水係数推定モデルを用いて、水分特性曲線から推定する方法が広く用いられている。特に水分特性曲線の関数モデルから不飽和透水係数の関数が得られる場合は、水分特性曲線-不飽和透水係数連結モデルとよばれ、水分特性曲線と不飽和透水係数を共通のパラメーターを用いた関数で表現できるので、非常に有用性が高いと考えられる。従って、水分特性曲線を基本に提案された経験式を活用して不飽和透水係数を求める間接的な方法が利用されている。本研究では、Childs & Collis-George⁸⁾による統計的間隙分布モデルを取り入れた、次に示す Fredlund & Xing³⁾の相対透水係数式(relative hydraulic conductivity function)を用いた。

$$k_r = \Theta^q(\psi) \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{dev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

$$k_r = k_w / k_s \quad (4)$$

ここで、 k_r : 相対透水係数,
 k_s : 飽和透水係数,
 k_w : 不飽和透水係数,
 $\Theta^q(\psi)$: 補正係数 (1.0),
 b : $\ln(10^6)$,
 e : 2.7182,

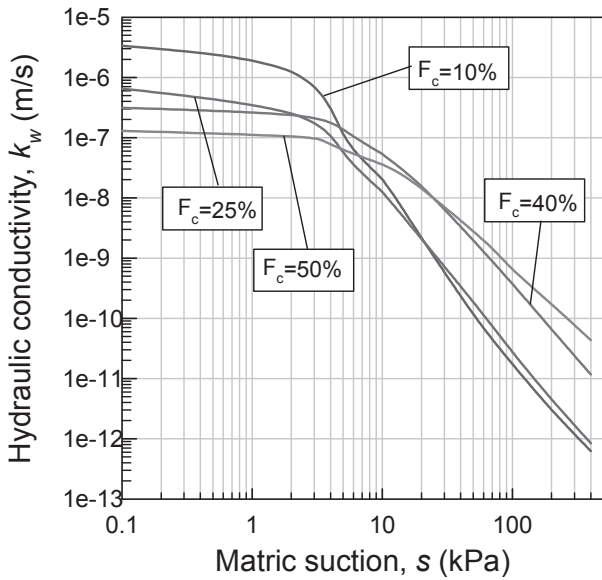


図-6 細粒分含有率(F_c)による不飽和透水係数推定結果

θ' : サクシオンに対する水分特性曲線の導関数,
 y : サクシオンに対する代数(logarithm)の変数,
 ψ_{aev} : 空気侵入値 (air entry value),
 θ_s : 飽和体積含水比.

3.3 不飽和透水係数の算定結果

図-6 は、式(3)、式(4)を用いて求められた細粒分含有率ごとの透水係数の推定結果を示している。この図より、サクシオンが低く水分量が多い状態では、細粒分含有率が低い場合の方が高い場合に比べて透水係数が高くなるのがわかる。また、サクシオンが高い領域では、細粒分含有率が低い場合の方が高い場合に比べて透水係数が低くなるのがわかる。一方、図-5の水分特性から推測すると、細粒分含有率が10%と25%の結果に対して40%と50%の水分特性曲線は、サクシオン変化に対して高い飽和度を維持する関係になっているので、常に透水係数が高くなることが予測される。つまり、この結果で示されるサクシオンの高い乾燥した状態では、図-6の結果とは逆に、細粒分含有率が低い場合の方が高い場合に比べて透水係数が高くなる関係となることが予測される。

細粒分含有率が高い場合、サクシオンの低い水分量が多い状態では細粒分含有率が低い場合に比べて透水係数が低い。そして、図-5の水分特性曲線より、細粒分含有率が高い場合ではサクシオンが増加した時、体積含水比はゆるやか減少する。そのため透水係数の減少もゆるやかになることが影響しているものと考えられる。

4. 河川堤防モデルによる浸透流解析

細粒分含有率による不飽和斜面への降雨浸透挙動を評価するため、浸透流解析を実施した。解析には、市販の有限要素プログラム⁹⁾を用い、降雨浸透による浸潤前線

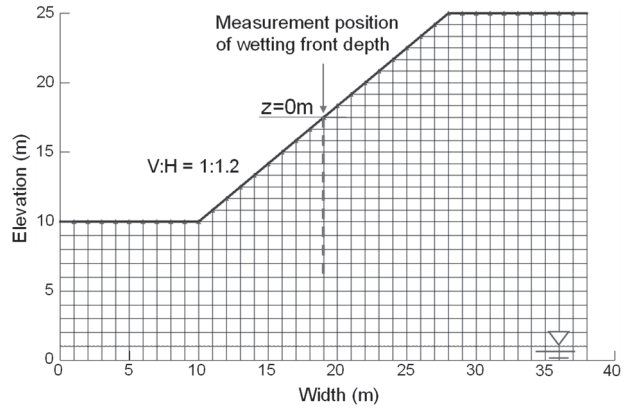


図-7 浸透流解析での斜面の解析モデル

(wetting front)の形成および地盤内の間隙水圧分布の変化に対する細粒分含有率の影響について調べた。ここで、浸潤前線は、不飽和土斜面において、降雨浸透により不飽和領域内に発生した浸透挙動によってほぼ飽和状態になる領域の先端部分である。

4.1 浸透流解析条件

4.1.1 解析モデル

解析には、実際の河川堤防から採取した試料の物性値を適用した。堤防の形状は、水平方向38m、高さ25mであり、この時の傾斜区間は、長さ18m、高さ15m(斜面勾配は、1:1.2)と設定した(図-7)。地下水位は、降雨浸透挙動の影響を排除するため、斜面のり先・下部で地表面から9m下に設定した。

4.1.2 解析条件

降雨条件は、堤防における浸透が飽和透水係数より降雨強度(I)が低くなると、浸透が遅くなるため、斜面への浸透が十分行う条件を与えた。よって、細粒分含有率が10%の飽和透水係数($k_s = 3.34 \times 10^{-6} \text{ m/s} = 12.0 \text{ mm/hr}$)基準として降雨強度、 $I=12.0 \text{ mm/hr}$ を適用した。また、降雨浸透境界面の条件として、地盤の飽和浸透能よりも多い雨の量は、浸透せずに地表面を流れるように設定した。

解析時間は、十分に降雨が浸透できるように4日間として、1h、3h、5h、10h、24h、48h、72h、96hの8段階で解析しており、浸透による地盤内部の間隙水圧の変化を調べた。このとき、間隙水圧の変化については、図-7に示すように堤防斜面の中央部の表層($z=0\text{m}$)を基準として浸透深度や間隙水圧の変化を解析した。また、初期条件としてのサクシオンを、細粒分含有率50%の水分特性曲線の空気侵入値より少し大きい14.0kPa(負の間隙水圧)と設定した。

なお、対象斜面の浸透特性として、各細粒分含有率で得られた水分特性曲線(排水経路、表-2参照)に、Fredlund & Xing³⁾の理論式(3)と(4)を適用して推定された不飽和透水係数を用いた。

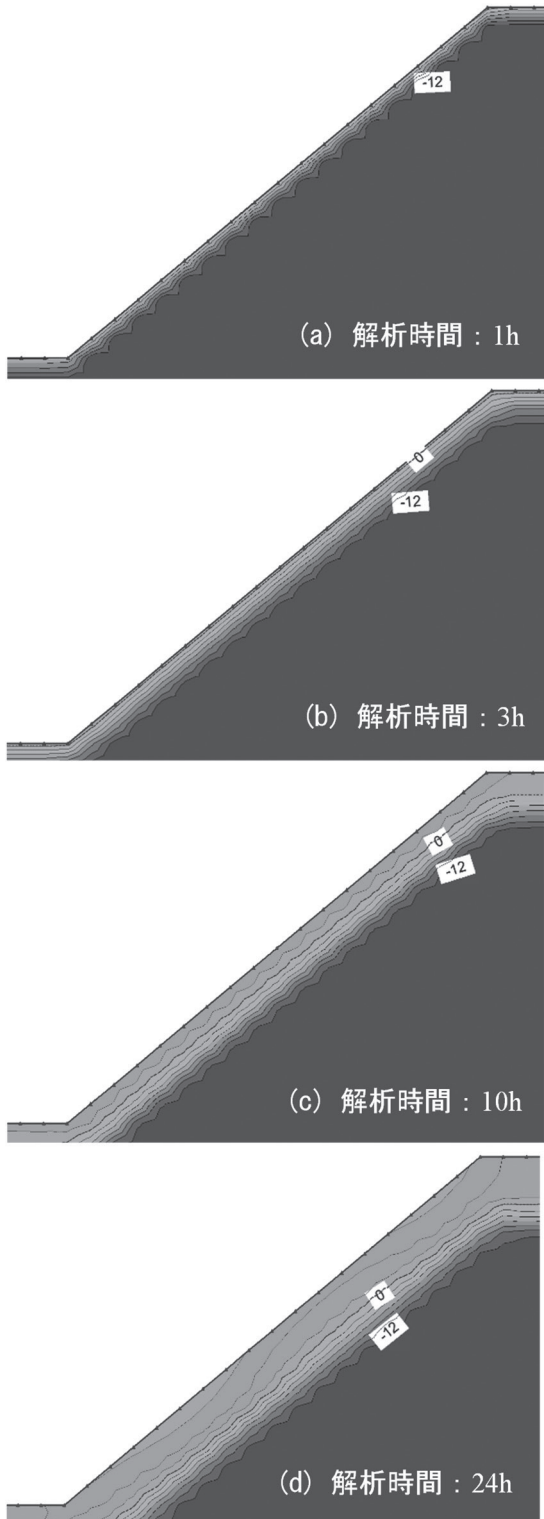


図-8 $F_c=10\%$ の場合の間隙水圧分布の変化(解析時間:1h, 3h, 10h, 24h)のケース. 図中の数字は, 間隙水圧の値 (kPa) を示している.)

4.2 浸透流解析による浸透深度の推定

4.2.1 細粒分含有率による浸潤前線の変化

図-8 は, 細粒分含有率 10%における解析時間: 1h, 3h, 10h, 24h での解析結果を示している. ここで, 図中の数値は間隙水圧の値を示し, 各ラインは, 2.0 kPa 間隔で描かれている. 間隙水圧がゼロになると降雨浸入により浸潤前線の形成と判断される. よって, 間隙水圧がゼロになるライ

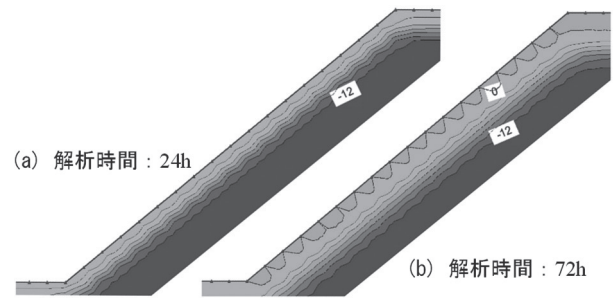


図-9 $F_c=25\%$ の解析結果(解析時間: 48h, 72h のケース. 図中の数字は, 間隙水圧の値 (kPa) を示している.)

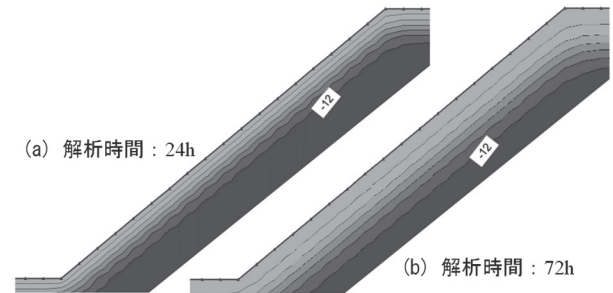


図-10 $F_c=40\%$ の解析結果(解析時間: 48h, 72h のケース. 図中の数字は, 間隙水圧の値 (kPa) を示している.)

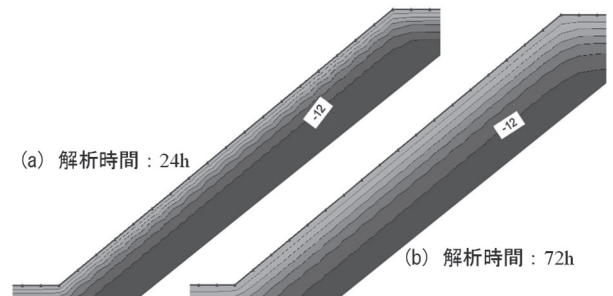
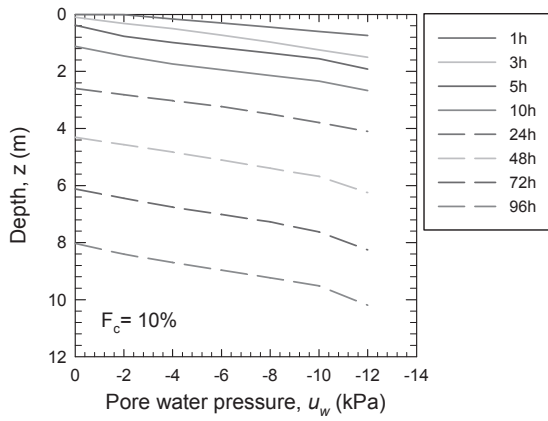


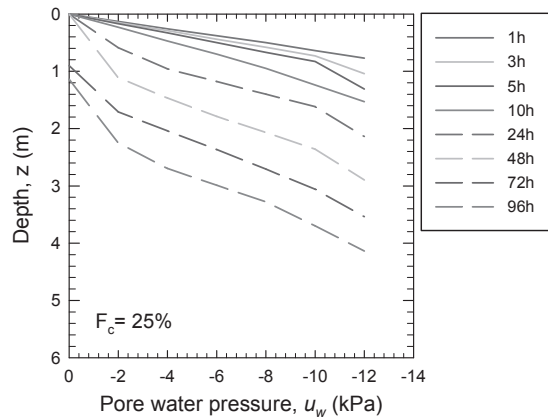
図-11 $F_c=50\%$ の解析結果(解析時間: 48h, 72h のケース. 図中の数字は, 間隙水圧の値 (kPa) を示している.)

ンを浸潤前線とする. 地盤の初期サクシオンは 14 kPa と設定されていたが, 解析時間 1 時間後に降雨浸透が始まり, 3 時間後に浸潤前線が形成されることが観察される. その後, 時間の経過と共に不飽和斜面に降雨が浸透し, 解析時間 24 時間後は, 斜面表面より 2.60m まで飽和されている. このように, 浸潤前線が斜面に生じることは, 斜面崩壊が発生する可能性が非常に高いと予測される.

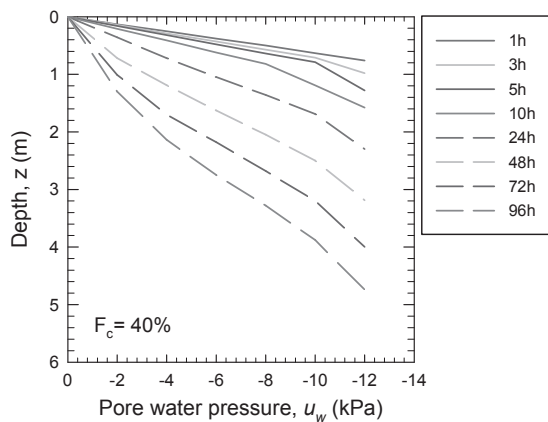
一方, 細粒分含有率 25%の場合, 解析時間 24 時間まで浸透があまり進まない状態であり, 解析時間 72 時間で浸潤前線が形成されていることが分かる(図-9). なお, 図-9 (b) で示されている浸潤前線ラインの凹凸線形は, 解析メッシュが粗い領域の影響で不自然な線形状になっていると判断される. 細粒分含有率 10%の結果と比べると, 浸透するまでの解析時間が増えていることが分かる. また, 細粒分含有率 40%と 50%の場合, 96 時間が経過した場合でも浸潤前線が確認されなかった(図-10, 11). しかし, 降雨の浸透により間隙水圧が時間の経過と共にゼロに近づき,



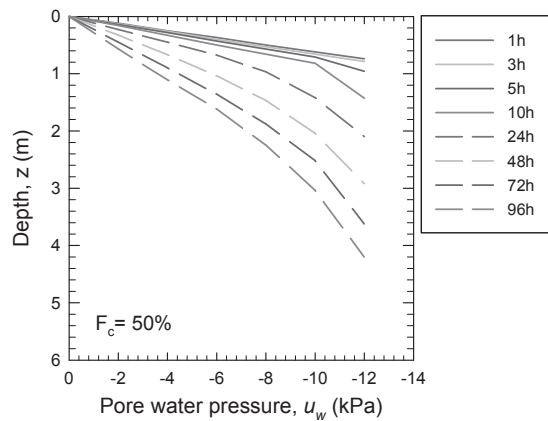
(a) $F_c=10\%$



(b) $F_c=25\%$



(c) $F_c=40\%$



(d) $F_c=50\%$

図-12 降雨浸透による間隙水圧の経時変化

表層部分から徐々に飽和状態に近づいていることが分かる。

4.2.2 降雨浸透挙動の比較

図-12は、斜面表面中央部に位置する観測点(図-7参照)における降雨浸透による間隙水圧の経時変化を比較したものである。解析時間1hでの細粒分含有率10%と25%、40%、50%との結果を比較すると、解析時間5hから時間が経過するにつれて浸透深度が細粒分含有率25%、40%、50%の結果に比べ大きく変化していることがわかる。また、細粒分含有率25%、40%、50%の場合では解析時間48hまでは浸透深度はあまり差がないことが分かる。しかし、解析時間72h後、細粒分含有率25%の場合では、浸潤前線が形成された。細粒分含有率40%と50%の場合では、時間が経過するにつれ、浸透深度の差が徐々に開き、細粒分含有率が増加すると浸透強度が低くなることが分かる。以上のことから、細粒分含有率25%、40%、50%の場合では細粒分含有率が増加するほど浸透しにくくなることが推測される。

前述した河川土工マニュアル²⁾における堤防材料の細粒分含有率の提案に対して本研究で用いた試料の浸透特性を考慮すると、細粒分含有率50%まで増加するほど、堤防の安全性が向上すると判断される。

5. 結論

本論文では、実際の河川堤防から採取したまさ土を用いて細粒分含有率が浸透特性に及ぼす影響について調べた。細粒分含有率10%、25%、40%、50%のケースについて透水試験、保水性試験を行い、水分特性曲線より不飽和透水係数を求め、その結果を用いた有限要素法による浸透流解析を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 細粒分含有率が高くなるにつれ、飽和透水係数は小さくなった。細粒分含有率10%の透水係数の結果を基準とした細粒分含有率(F_c)の増加による透水係数の低下比は、 $F_c=25\%$ が1/5.0、 $F_c=40\%$ が1/10.5、 $F_c=50\%$ が1/25.3であった。また、細粒分含有率と飽和透水係数の関係は、比例関係が得られ、近似直線によれば、細粒分含有率が0%での透水係数が 5.57×10^{-6} m/sと予測された。本研究では、堤防材料の細粒分含有率(F_c)による飽和透水係数のユニークな結果が得られた。しかし、この関係を堤防現場の試料について適用するためには、今後、他の試料においても検討する必要があると考えられる。
- (2) 水分特性曲線では、細粒分含有率(F_c)が高いほど、同じ飽和度の条件でサクシジョンの値が大きくなり、空気侵入値の値も大きくなった。細粒分含有率の増加は、乾燥密度が増加する効果と同様であると考えられる。
- (3) 細粒分含有率が低い場合、サクシジョンが低く、水分量が多い状態では、細粒分含有率が高い場合に比べて不

飽和透水係数が高くなった。細粒分含有率が低い場合では、サクシオンが増加すると、急激に体積含水比が減少し、それに伴い不飽和土透水係数も急激に減少した。よって、細粒分含有率が10%と25%の結果に対して40%と50%の水分特性曲線の関係と比べると、サクシオンの高い乾燥状態では、細粒分含有率が高い場合に比べて不飽和透水係数が低くなることが観察された。一方、細粒分含有率が高い場合、サクシオンの低い水分量が多い状態では、細粒分含有率が低い場合に比べて透水係数が低い。サクシオンの増加とともに、体積含水比の減少量は少なくなっていた。そのため透水係数も緩慢に減少していることが観察された。

- (4) 浸透流解析では、粒分含有率が10%の時には浸潤前線が形成されたことが確認された。しかし、細粒分含有率25%、40%、50%の結果では、細粒分含有率が増加するほど降雨浸透しにくくなり、細粒分含有率40%と50%では浸潤前線が形成されていないことが確認された。
- (5) 河川土工マニュアル²⁾においては、堤体材料の細粒分含有率は、難透水性を確保するために15%以上、乾燥時にクラックが入らないように50%以下と提案している。本研究で用いた試料では、細粒分含有率が50%まで増加するほど、浸透しにくくなり堤防の安全性が向上すると判断される。

今後の課題として、実際の河川堤防での状態を再現するために、より多くの試料について細粒分含有率を変化させた場合の土の浸透特性値を測定し、浸透流解析を行うことが挙げられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人 ウェスコ学術振興財団 平成27

年度学術研究費助成により実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 金 秉洙, 桐岡 大典, 上田 健人, 加藤 正司, 竹下 祐二: 河川堤防内の細粒分含有率による不飽和土地盤特性に関する研究, 第50回地盤工学研究発表会, 北海道, pp.463-464, 2015.
- 2) 財団法人 国土技術研究センター: 河川土工マニュアル, pp. 62-66, 2009.
- 3) Fredlund, D.G. and Xing, A.: Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532, 1994.
- 4) Brooks, R.H., and Corey, A.T.: Properties of porous media affecting fluid flow. *J. Irrig. Proc. Drainage Div., ASCE*, Vol. 72(IR2), pp.61-88, 1964.
- 5) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 6) Kosugi, K.: Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 891-901, 1994.
- 7) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, Vol. 12, pp. 513-522, 1976.
- 8) Childs, E.C., and Collis-George, N.: The permeability of porous materials. *Proceedings, Royal Society, London, Series A*, Vol. 210, pp. 392-405, 1950.
- 9) GEO-SLOPE International Ltd.: Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis, *User's guide*, Calgary, Canada, 2004.

(2016年6月20日 受付)

